

STR을 이용한 가솔린 엔진의 공연비 제어 성능 향상에 관한 연구

A Study on the Improvement of Air-Fuel Ratio Control Performance in SI Engine Using STR

신규철*, 박승범*, 윤팔주**, 정남훈*, 선우명호***
Kyuchul Shin, Seungbum Park, Paljoo Yoon, Namhoon Juong, Myoungho Sunwoo

ABSTRACT

This study presents a self tuning regulator(STR) to improve the air-fuel ratio control performance of gasoline engine. The STR is designed based on the nonlinear dynamic engine model, and the performance of the STR is evaluated through the simulation and experiments. The STR shows better performance than a conventional PI controller in terms of the response time and disturbance rejection. Since the STR has less calculation load than the complex nonlinear controller, this algorithm can be easily applied to on-board engine controller.

주요기술용어 : Air-fuel ratio(공연비), Fuel film(연료막), Model following(모델 추종), Reference model(기준 모델), Self tuning regulator(자기동조제어기)

Nomenclature

b, c	: wall wetting coefficient of actual engine	$a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_m$: plant parameters
b_{comp}, c_{comp}	: wall wetting coefficient of compensator	α, γ	: projection algorithm parameter
d	: time delay	λ	: excess air factor
T	: sampling time	φ	: measurement vector
u	: control input	θ	: parameter vector
u_c	: command signal	τ_f	: time constant
u_f	: injected fuel flow rate		
x_f	: mass of fuel film		
X	: fuel film fraction		
y	: output		
y_f	: fuel flow rate entering cylinder		

1. 서론

최근 자동차의 증가에 따른 대기오염 문제가 심각해지면서 자동차의 유해 배기가스에 대한 규제가 더욱 강화되고 있다. 이에 따라서 배기규제를 만족시키고, 자동차의 성능향상을 위한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 자동차에서 배출되는 유해 배기가스(HC, CO, NOx)를 줄이기 위해서는 3원 촉매장치의 변환효율을 극대화 시켜야

* 회원, 한양대학교 대학원
** 회원, 만도 기술연구소
*** 회원, 한양대학교 자동차공학과

하며, 이를 위해서는 엔진의 운전 조건에 따라 연료를 적절히 분사하여 이상적인 연소조건을 유지해야 한다. 최근에는 마이크로 프로세서의 성능발전과 더불어 전자식 연료분사 시스템이 보편화되면서 보다 정밀한 공연비 제어가 가능해졌다. 현재 일반적으로 사용되고 있는 공연비 제어방식은 엔진의 운전조건에 따른 앞먹임 제어(feedforward control)와 산소센서를 이용한 뒤먹임 제어(feedback control)를 병행하여 공연비 제어를 수행하고 있다. 그러나 정상상태의 엔진 실험 결과를 기반으로 한 제어방식으로는 과도 운전조건에서 공연비를 정확히 제어하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 제어를 목적으로 하는 엔진의 모델링작업과 모델 기반 제어(model-based control)에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다.^{1,2)} 모델 기반의 비선형 제어기는 엔진의 동적 특성을 비교적 정확히 반영하기 때문에 제어성능을 향상시킬 수 있으나, 계산량이 많아 실제차량에 적용하기 위해서는 좀더 간단한 제어를 필요로 하게 된다.

이 논문에서는 엔진의 모델을 간단한 선형시스템으로 가정하고, 모델의 파라미터를 추정하여 운전조건에 따라 제어값(control gain)을 변화시킴으로써 공연비의 제어성능을 높이고, 계산량을 줄여 실시간으로 제어할 수 있는 자기동조 제어기(self tuning regulator : STR)를 설계하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통하여 공연비 제어성능을 검증하였다.

2. STR의 기본 구조

선형제어기의 경우 플랜트의 동적특성이 변하게 되면 제어성능이 변화된다. 이 문제를 해결하기 위해서는 제어 게인을 플랜트의 동적 특성에 맞게 조절하여야 한다. 이를 위해 STR을 적용하였으며, 그 구조는 Fig. 1과 같다.

STR의 적용을 위해 엔진을 선형모델로 간략화하고 운전조건에 따른 파라미터를 추정한 후, 추정된 모델의 출력이 기준모델의 출력(r(k))과

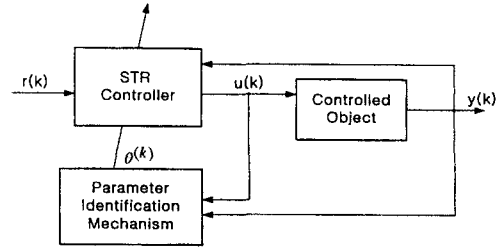


Fig. 1 Structure of adaptive self-tuning regulator

같아지도록 제어기의 게인을 조절함으로써 제어 성능을 향상시키고 계산량을 최소화한다. 선형엔진 모델의 파라미터를 추정하기 위해서는 modified projection algorithm을 이용하였다.

2.1 Modified Projection Algorithm

제어대상 플랜트는 선형화된 입력과 출력의 함수로 나타낼 수 있으며, 식(1)과 같이 표현된다.^{1,3)}

$$y(t) = -a_1y(t-1) - a_2y(t-2) - \dots - a_ny(t-n) + b_0u(t-d_0) + \dots + b_mu(t-d_0-m) \quad (1)$$

이때 시스템의 차수는 $\max(n, d_0 + m)$ 이 된다.

위의 모델은 변수들에 대해 선형이므로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = \varphi^T(t-1)\theta \quad (2)$$

여기서, $\theta^T = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_n \ b_0 \ b_1 \ \dots \ b_m]$

$$\varphi^T = [-y(t-1) \ -y(t-2) \ \dots \ -y(t-n) \ u(t-d_0) \ u(t-d_0-1) \ \dots \ u(t-d_0-m)]$$

위 식을 이용한 Modified Projection Algorithm은 다음과 같다.³⁾

$$\theta(t) = \theta(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \quad (3)$$

$$\varepsilon(t) = y(t) - \varphi^T(t)\theta(t-1) \quad (4)$$

$$K(t) = \frac{\gamma\varphi(t-1)}{\alpha + \varphi^T(t-1)\varphi(t-1)} \quad (5)$$

2.2 모델추종(Model Following)

모델추종³⁾의 기본 개념은 플랜트가 원하는 페루프 극점을 갖도록 제어기를 설계하는 것이

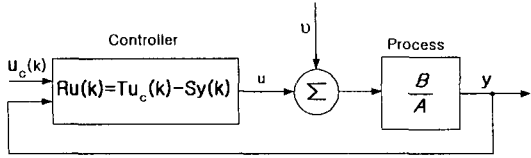


Fig. 2 Structure of model following

다. Fig. 2는 모델추종 제어기의 개략도이며, 제어기는 플랜트의 출력($y(k)$)이 명령신호($u_c(k)$)를 추종할 때, 추종성능이 기준모델(reference model)과 같도록 제어 값($R(z^{-1}), T(z^{-1}), S(z^{-1})$)을 결정함으로써 원하는 성능을 얻도록 하는 것이다.

3. STR 설계

3.1 탠덤형(Tandem type) STR

가솔린엔진의 정확한 공연비 제어를 수행할 때 제어기의 출력은 일반적으로 인젝터의 연료 분사량이다. 따라서 탠덤형 STR은 Fig. 3에서와 같이 엔진 운전 조건에 따라 모델로부터 계산된 연료량과 실제 실린더 내의 연료량을 입력과 출력으로 하여 공연비 제어를 수행하는 구조를 갖는다.

그러나 탠덤형 STR의 경우 다음과 같은 이유로 강인성(robustness)이 낮게 된다.

1) 탠덤형 STR의 계산된 연료량은 추종하고자 하는 연료량과 같게 된다. 따라서 계산된 연료량이 외란이나 모델의 오차에 의해 잘못된 값을 갖을 경우 추종하고자 하는 값에도 오차가 존재하게 된다.

2) 제어기의 출력인 실린더 내의 연료량은 직접 측정할 수 없고 측정된 공연비로부터 추정한다.

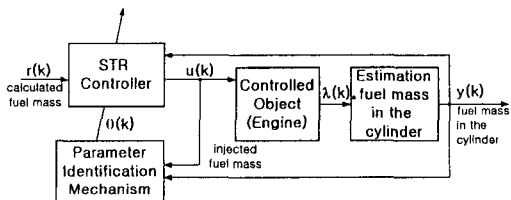


Fig. 3 Block diagram of tandem type STR

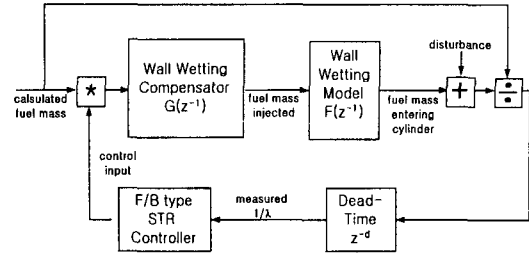


Fig. 4 Block diagram of feedback type STR

값이므로 공기량 측정오차에 민감하다.

3) 제어기의 변수추정에 적은 오차가 존재하게 되면 제어입력에는 큰 오차가 생길 위험이 있게 된다.

3.2 되먹임형(Feedback type) STR설계

탠덤형 STR이 외란에 의한 강인성이 낮은 문제는 실린더내의 연료량 대신 λ (공기과잉률)를 시스템의 출력으로 이용함으로써 해결할 수 있다. 실린더내의 연료량 대신 λ 를 이용하게 되면 모델에 오차가 있을 경우 추종하고자 하는 값에도 오차가 생길 수 있는 문제를 해결할 수 있고, 출력이 추정된 값이 아닌 측정 가능한 값이 된다. 또한 추정값이 엔진 운전 조건에 따라 크게 바뀌지 않으므로 제어 입력에 큰 오차가 생길 위험을 방지할 수 있다.²⁾

이 실험에서 설계한 되먹임형 STR의 구조는 Fig. 4와 같이 연료막 생성에 의한 영향을 보상하기 위한 연료막 보상, 엔진의 연료막 모델, 공연비 제어성능이 기준모델의 추종성능과 같도록 제어값을 조절하는 제어기 설계부분으로 구분할 수 있다. 이때 제어 입력은 엔진 운전 조건에 따라 결정된 연료 분사량의 보상이 된다. 시뮬레이션에서는 실제 엔진운전 조건과 같은 조건을 나타내기 위해 외란을 가해 주었고, 시간지연은 1 사이클로 가정하였다.

3.2.1 연료막 보상

연료막 생성에 대한 보상모델은 연료막 모델의 역함수가 되며 식(6)과 같이 표현된다.^{2,4,5)}

$$G(z^{-1}) = \frac{1 - c_{comp}z^{-1}}{b_{comp} - (b_{comp} - 1 + c_{comp})z^{-1}} \quad (6)$$

이때 b_{comp} , c_{comp} 값은 실험을 통해 구해진 값을 이용하게 된다.

3.2.2 연료막 모델

가솔린 엔진의 연료막 모델은 분사되는 연료량(\dot{m}_f)과 실린더로 들어가는 연료량(\dot{m}_{fc})을 입력과 출력으로 하여 상태방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{x}_f = -\frac{1}{\tau_f} x_f + X u_f \quad (7)$$

$$y_f = \frac{1}{\tau_f} x_f + (1 - X) u_f \quad (8)$$

식(7)과 (8)에서 입력과 출력의 전달함수를 구해보면 다음 식과 같다.

$$\frac{Y_f(S)}{U_f(S)} = \frac{1}{\tau_f} \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_f}} X + (1 - X) \quad (9)$$

식(9)를 이산화하여 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{Y_f(z)}{U_f(z)} = \frac{b - (b - 1 + c)z^{-1}}{1 - cz^{-1}} \quad (10)$$

여기서, $a = \frac{1}{\tau_f}$, $b = 1 - X$, $c = e^{-aT}$

실제 엔진에서의 출력 $y(k)$ 는 산소센서의 측정값으로부터 구한다. 따라서 연료가 분사되어 산소센서로부터 출력이 나오기까지 시간지연이 있게 된다. 이를 모델에 적용하면 연료막 모델은 식(11)과 같이 표현할 수 있다.

$$F(z^{-1}) = \frac{b - (b - 1 + c)z^{-1}}{1 - cz^{-1}} \quad (11)$$

3.2.3 제어기 설계

제어기는 제어 입력과 측정된 공연비를 이용하여 엔진 모델의 파라미터를 추정 후, 실린더 내 공연비가 이론 공연비가 되도록 분사 연료량을 보상하게 된다.

엔진의 운전조건에 따라 요구되는 실린더내의 연료량은 모델로부터 계산된 연료량과 제어 입력의 곱이 되고, 실제 실린더 내의 연료량은 계산된 실린더 내의 연료량에 연료막 보상과 연료막 모델을 적용하여 계산될 수 있다.

$$\dot{m}_{fcd} = \dot{m}_{fcal} u \quad (12)$$

$$\dot{m}_{fc} = G(z^{-1})F(z^{-1}) \dot{m}_{fcd} \quad (13)$$

제어 입력과 출력사이의 전달함수는 식(12)와 (13)을 이용하여 구하면 다음과 같다.

$$y = \frac{1}{\lambda} = \frac{\dot{m}_{fc}}{\dot{m}_{fcal}} = G(z^{-1})F(z^{-1})u \quad (14)$$

제어기는 추종성능이 기준 모델의 추종성능과 같도록 제어값을 결정하게 되므로, 일반적으로 기준모델의 차수는 플랜트의 차수와 같도록 결정하며, 원하는 추종성능을 갖도록 적절한 극점(pole)과 영점(zero)을 갖는 모델로 선정한다.

따라서 기준모델은 다음과 같이 표현된다.^{1,3)}

$$A_m(z^{-1}) = 1 + a_{m1}z^{-1} + a_{m2}z^{-2} + a_{m3}z^{-3} \quad (15)$$

$$B_m(z^{-1}) = \beta B(z^{-1})$$

$$\text{여기서, } \beta = \frac{A_m(1)}{B(1)} = \frac{1 + a_{m1} + a_{m2} + a_{m3}}{b_{p0} + b_{p1} + b_{p2}}$$

기준모델을 이용하여 Diophantine 방정식을 풀면 제어 계인을 결정할 수 있다. Diophantine 방정식은 식(16)과 같다.

$$A_c(z^{-1}) = A(z^{-1})R(z^{-1}) + B(z^{-1})S(z^{-1}) \quad (16)$$

$$= A_0(z^{-1})A_m(z^{-1})$$

여기서, $A_0(z^{-1})$: 대표극점(dominant pole)으로 적정한 감쇄값이 되도록 결정한다.

이때 $A_0(z^{-1})$, $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ 의 차수는 다음과 같이 결정한다.^{3,7)}

$$\begin{aligned} \deg A_0 &\leq \deg A - 1 = 2 \\ \deg R &= \deg A_0 - \deg A = 2 \\ \deg S &< \deg A \end{aligned} \quad (17)$$

여기서, deg: 다항식의 차수

위 식(16)과 (17)을 이용하여 다음과 같이 $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ 를 결정할 수 있다.

$$R(z^{-1}) = 1 + r_0 z^{-1} + r_1 z^{-2} \quad (18)$$

$$S(z^{-1}) = s_0 + s_1 z^{-1} + s_2 z^{-2} \quad (19)$$

Polynomial $T(z^{-1})$ 는 일반적으로 다음과 같이 결정한다.³⁾

$$T(z^{-1}) = \beta A_0(z^{-1}) \quad (20)$$

위에서 구한 $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$, $T(z^{-1})$ 를 이용하여 제어 입력을 구하면 다음과 같다.

$$R(z^{-1})u(t) = T(z^{-1})u_c(t) - S(z^{-1})y(t) \quad (21)$$

4. 시뮬레이션 및 실험 결과

공연비 제어성능은 시뮬레이션과 실제 엔진 실험을 통하여 검증하였다. 실제 엔진 실험은 4 실린더 2000cc, DOHC 가솔린 엔진에서 수행하였으며, 와전류식 동력계를 사용하여 일정한 회전속도와 일정한 부하토크 운전상태에서 과도상태의 제어성능을 비교하였다.

점화시기와 연료분사제어는 개개의 실린더를 독립적으로 제어할 수 있는 엔진제어 시스템을 이용하여 수행하였다. 이 장치는 크랭크축에 장착된 로터리 엔코더 신호와 캠 센서 신호를 이용하여 엔진과 동기되어 실린더별로 연료 및 점화시기를 정밀하게 제어할 수 있는 장치이다.⁶⁾

4.1 시뮬레이션 결과

Fig. 5는 제어기의 제어성능을 검증하기 위해 가해진 스로틀 개도와 시뮬레이션을 통해 구해진 엔진 회전 속도를 도시한 것이다.

Fig. 6은 시뮬레이션을 통한 비례 적분제어기와 되먹임형 STR의 제어성능을 비교한 것이다. 되먹임형 STR의 경우 과도상태에서 비례 적분 제어기에 비해 공연비 제어오차를 크게 줄일 수 있고, 응답성도 향상시킬 수 있음을 보여준다.

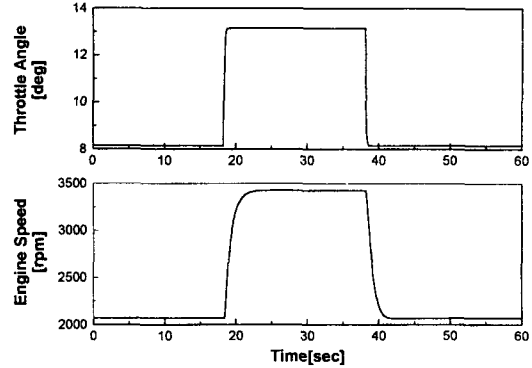


Fig. 5 Throttle angle pattern and engine speed : simulation

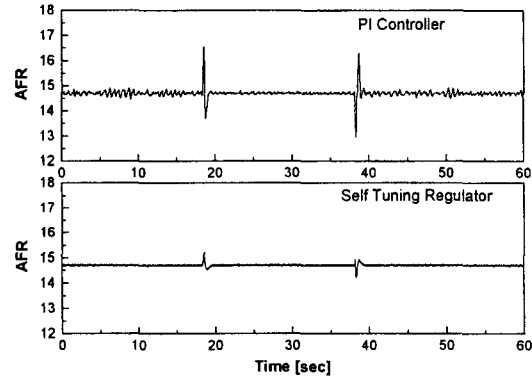


Fig. 6 Control performance of PI controller and STR : simulation

4.2 엔진실험 결과

4.2.1 탠덤형 STR제어성능 결과

탠덤형 STR의 경우 모델에 오차가 있을 경우 출력에도 오차가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서는 모델의 오차를 추정하여 보상을 해주어야 한다.

이 실험에서는 흡입 공기량 모델의 오차를 보상하기 위하여 공연비를 이용하여 흡입 공기량 모델 오차를 추정하였고, 추정된 오차를 모델에 적용하여 공연비 제어를 수행하였다.

Fig. 7은 부하토크가 일정할 때(70Nm) 탠덤형 STR의 공연비 제어 성능과 공기 유량센서에서 측정된 값과 흡입공기량 모델의 오차를 도시한

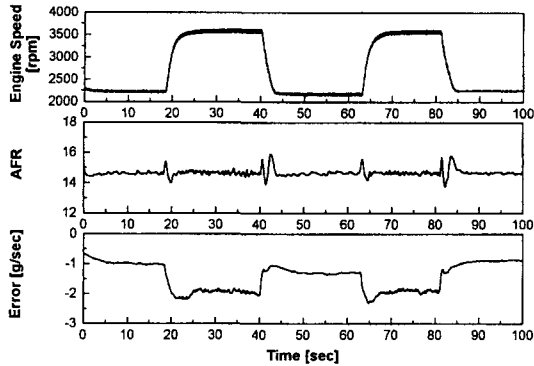


Fig. 7 Control performance of tandem type STR in RPM transient condition : experiment

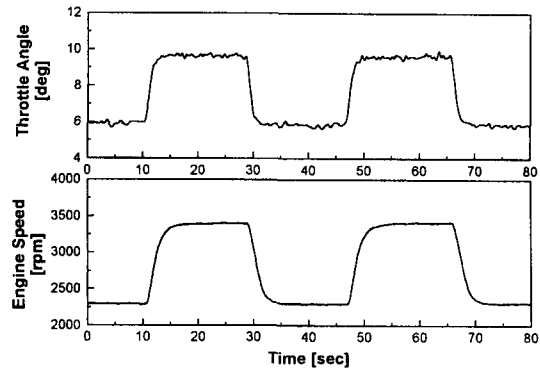


Fig. 9 Throttle angle pattern and engine speed in RPM transient condition : experiment

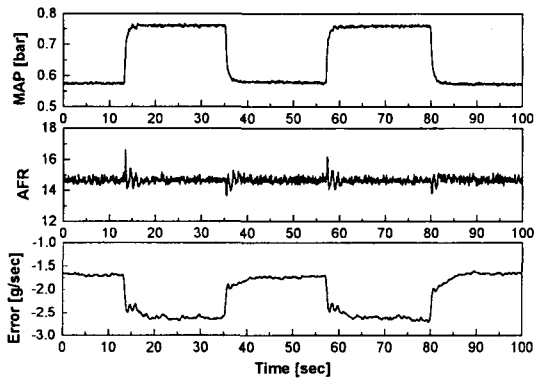


Fig. 8 Control performance of tandem type STR in load transient condition : experiment

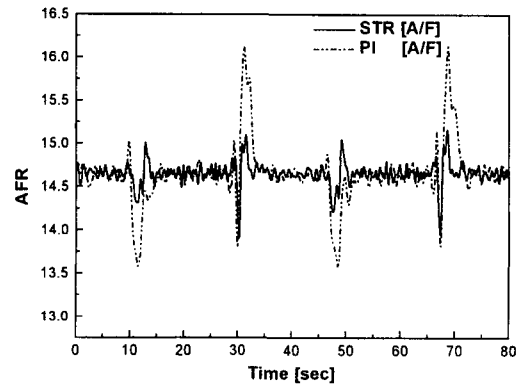


Fig. 10 Control performance of PI controller and feedback type STR in RPM transient condition : experiment

것이고, Fig. 8은 엔진 회전속도를 2000rpm으로 일정하게 운전할 때 텐덤형 STR의 공연비 제어 성능을 도시한 것이다. 결과에서 보듯이 과도상태에서 공연비 오차가 크고 응답성도 늦음을 알 수 있다.

4.2.2 되먹임형 STR 제어성능 비교분석

1) 부하토크가 일정할 경우

Fig. 9는 되먹임형 STR의 제어성능을 검증하기 위해 실제 엔진에 가해진 스로틀 개도와 엔진의 회전 속도를 도시한 것이다. 실험 조건은 되먹임형 STR에서와 동일한 조건으로 하였다.

Fig. 10은 시험엔진의 부하토크가 일정할 때 비례 적분제어기와 되먹임형 STR의 제어 성능

을 비교한 것이다. 되먹임형 STR의 경우 시뮬레이션 결과와 마찬가지로 과도상태에서 비례 적분 제어기에 비해 공연비 제어오차의 실효값(RMS)은 0.16으로 PI제어기의 0.31보다 48% 감소하였으며 응답특성도 향상되었다.

2) 엔진 회전속도가 일정할 경우

Fig. 11은 엔진 회전속도를 일정하게 운전할 경우 되먹임형 STR의 제어성능을 검증하기 위해 실제 엔진에 가해진 스로틀 개도와 매니폴드의 압력을 나타낸 것이다.

Fig. 12는 엔진 회전속도가 일정할 때, 비례 적분제어기와 되먹임형 STR의 제어 성능을 나타낸다. 부하토크가 일정할 때와 마찬가지로 비례

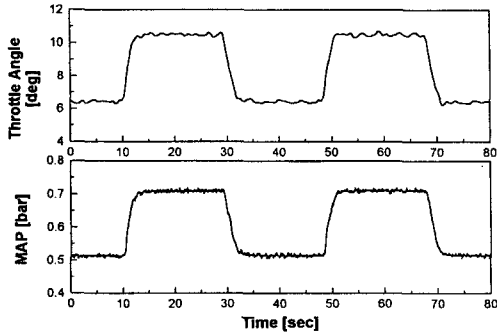


Fig. 11 Throttle angle pattern and MAP in load transient condition : Experiment

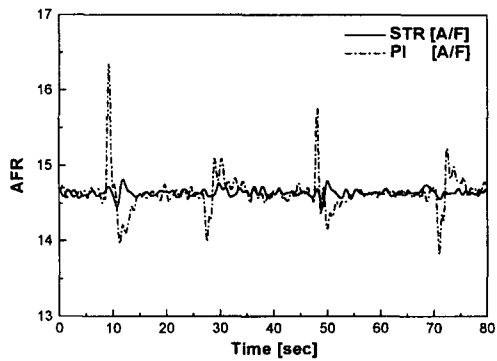


Fig. 12 Control performance of PI controller and feedback type STR in load transient condition : experiment

적분제어기에 비해 되먹임형 STR의 경우 과도 상태에서 공연비 제어오차의 실효값은 0.022로 PI제어기의 0.039보다 44% 감소하였고, 응답성도 향상된다.

엔진의 운전조건에 따라 제어값을 조절해 주는 되먹임형 STR의 경우 과도상태에서 PI제어기에 비해 제어성능이 우수함을 볼 수 있다. 그러나, 텐덤형 STR의 경우 모델의 오차가 크게 되면 오차의 추종과 모델의 추종이 동시에 이루어져야 하므로 제어성능향상을 위해서는 모델의 정확성이 요구된다.

5. 결론

이 연구에서는 가솔린엔진의 공연비 제어성

능을 향상시키기 위하여 STR을 설계하였다. 이 STR제어기를 이용하여 가솔린 엔진의 공연비 제어를 수행하였으며, 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 가솔린 엔진의 공연비 제어 성능을 향상시키기 위하여 적응제어기법 중 하나인 STR을 설계하여 시뮬레이션과 실험을 통하여 제어기의 성능을 검증하였다. 이 적응제어기 STR은 두개의 다른 형태(Tandem type, Feedback type)로 설계하여 제어기성능을 비교·분석하였다.

2) 텐덤형 STR과 되먹임형 STR의 공연비 제어 성능을 비교하였다. 되먹임형 STR의 경우 모델에 오차가 존재하더라도 공연비 제어오차의 실효값이 텐덤형 STR에 비해 53% 정도 감소하였고, 응답성도 향상되었다.

3) 되먹임형 STR은 엔진의 운전조건에 따라 제어값이 적절히 조절되므로 비례 적분제어기에 비해 과도운전 상태의 공연비 제어오차의 실효값을 46% 정도 줄일 수 있었다.

4) 이 연구에서 설계한 되먹임형 STR은 비선형제어기에 비하여 계산량이 적어 실시간 제어에 이용할 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) I. D. Landau, "The R-S-T Digital Controller Design and Applications," Control Engineering Practice 6(1998), pp.155-165, 1997.
- 2) H. Maki, S. Akazaki, "Real Time Engine Control Using STR in Feedback System," SAE 950007, 1995.
- 3) K. J. Astrom, Bjorn Wittenmark, "Adaptive Control," Addison-Wesley Publishing Company, 1996.
- 4) R. C. Turin, H. P. Geering, "Model-Based Adaptive Fuel Control in an SI Engine," SAE 940374, 1994.
- 5) C. H. Onder, C. A. Roduner, "Wall-Wetting Parameters Over the Operating Region of a Sequential Fuel-Injected SI Engine," SAE 980792, 1998.

- 6) 윤팔주, 김명준, 선우명호, “크랭크 각 기준의 엔진 제어시스템 설계 · 제작에 관한 연구,” 자동차공학회 논문집, 제6권 4호, 1998.
- 7) L. Guo, “Convergence and Logarithm Laws of Self-tuning Regulators,” *Automatica*, Vol.31, pp. 435-450, 1995.